

МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В ПЛИННОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Й. Й. БІЛИНСЬКИЙ¹, М. В. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ^{2*}, В. Б. БУРДЕЙНИЙ¹

¹ Кафедра електроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА

² Філія центр метрології та газорозподільних систем НАК «Нафтогаз України», Боярка, УКРАЇНА

*email: mgladysheskyi@yahoo.com

АНОТАЦІЯ В роботі проведено дослідження особливостей розповсюдження акустичних хвиль ультразвукового діапазону в плинному середовищі. Дослідження дало змогу розробити модель розповсюдження ультразвукових хвиль в межах ближньої зони. Детальний аналіз розповсюдження хвиль дало змогу встановити тиск ультразвукової хвилі на приймачі, залежно від швидкості потоку та частоти коливань. Таким чином, результати моделювання дозволили зробити висновок про можливість розробки метода вимірювання швидкості потоку на основі використання ближньої зони ультразвукового перетворювача.


Ключові слова: ультразвукові коливання; ближня зона; тиск звукової хвилі; швидкість потоку; частота ультразвукових коливань; швидкість поширення хвилі; плинне середовище

MODEL OF DISTRIBUTION OF ULTRASONIC WAVES IN FLOWING MEDIUM

Y. BILYNSKY^{1*}, M. GLADYSHEVSKY^{2*}, V. BURDANY¹

¹ Department of Electronic and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, UKRAINE

² Center for Metrology and gas distribution network NJSC "Naftogaz of Ukraine", Boyarka, UKRAINE

ABSTRACT This article shows the research done upon characteristics of acoustic waves propagation in ultrasonic range of frequencies in flowing medium. As of today, such research is motivated not so much as scientific interest as practical need. And this need explained as that ultrasonic waves is a good tool in solving wide range of technical and scientific tasks. Longitudinal and transversal waves, that are being distributed through medium as acoustic waves are the waves of small volumetric change (longitudinal waves) and waves of deformation without volume change (transversal waves). Speed of acoustic wave propagation (speed of sound) depends on if the waves are longitudinal or transversal not only on medium. Volume change that is caused by propagation of longitudinal waves is given as pressure change in a medium. This pressure change due to wave propagation in the point is defined as acoustic pressure. Picture 1 (a) shows function change along x axis. This function creates number of oscillations where x tends to increase. When $x \approx x_0 = a^2/\lambda$ it reaches its last maximum and then slowly goes down. And the area  in which function $|I|$ creates oscillations is called as near zone. On Picture 3 dependency graph of function $|I|$ on flow rate and ultrasonic wave frequency is shown. From the graph can be seen that only in some relations of flow rate and frequency function $|I|$ reaches its maximum value. Based on this modulation the next one became possible which is shown on Picture 4 and represents the dependence of acoustic pressure on flow rate and frequency. Equation 6 represents a mathematical model of ultrasonic wave propagation in flowing medium, which shows how signal behaves in the near zone due to the frequency and flow rate change. The simulation results allow concluding the possibility of developing a new method for flow rate measurement based on use of near zone of ultrasonic propagation.

Keywords: ultrasonic waves; near zone; sound wave pressure; flow rate; ultrasonic wave frequency; speed of wave propagation; flowing medium

Вступ

На сьогодні, існуючі методи вимірювання витрати плинних середовищ, які наведені в роботі [1], дозволяють задовольнити переважно більшість сфер застосування. В результаті аналізу існуючих методів вимірювання витрати, саме для нафтогазової сфери було виділено ультразвуковий метод вимірювання, як найбільш актуальний на сьогоднішній день через ряд технічних та метрологічних характеристик [2]. Незважаючи на те, що існуючі ультразвукові витратоміри задовольняють майже всі вимоги промисловості, все ж таки вдалося знайти проблемну область, а саме наповнення балонів автомобілів на автомобільних газонаповнювальних станціях, що

пов'язана з використанням витратомірів малих діаметрів та не постійними режимами роботи [3]. В свою чергу, це спонукало до детального дослідження ультразвукових коливань, та їх можливостей використання на малих відстанях.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження особливостей розповсюдження акустичних хвиль ультразвукового частотного діапазону в плинному середовищі та отримання математичної моделі розповсюдження ультразвукової хвилі в плинному середовищі в межах ближньої зони.

Викладення основного матеріалу

Дослідження особливостей розповсюдження акустичних хвиль ультразвукового частотного діапазону в газах і твердих тілах мотивуються не стільки чисто науковими інтересами, скільки практичними потребами. Останнє пояснюється тим, що ультразвукові хвилі являються ефективним інструментом для рішення широкого переліку технічних і наукових задач.

Поздовжні і поперечні хвилі, що поширюються в середовищі як акустичні хвилі, є хвилями невеликих змін об'єму (поздовжні акустичні хвилі) і хвилями деформації без змін об'єму (поперечні хвилі), відповідно. Плинні середовища, за винятком в'язкопружних флюїдів, не підтримують деформації, і в результаті зсуву хвилі не поширюються в середовищі. Швидкість поширення акустичних хвиль (швидкість звуку) залежить від того, чи є хвилі поздовжні або поперечні, а не лише від середовища.[4]

Для акустичних хвиль, що поширюються в плинному середовищі, тобто поздовжніх акустичних хвиль, зміна об'єму, викликана поширенням поздовжніх хвиль, представлена як зміна тиску в середовищі. Якщо швидкість потоку рідини набагато менша, ніж швидкість звуку в середовищі, розповсюдження акустичних хвиль описується як зміна тиску p відносно статичного тиску (тиску без поширення акустичних хвиль, p_0). Зміна тиску в результаті поширення хвилі у точці визначається як акустичний [5].

У процесі перетворення механічних коливань в електричні в результаті проходження через деяке середовище в перетворювачі відбувається усереднення сигналу, прийнятого різними точками ультразвукового приймача. При роботі одного й того ж перетворювача як випромінювача так і приймача вираз для тиску на приймачі має вигляд [6]:

$$P = \frac{K}{S_a} P_0 I^2, \quad (1)$$

де S_a – площа перетворювача; K – коефіцієнт пропорційний формі та площі перетворювача; функція I для точок на осі дископодібного перетворювача радіусом a визначається як:

$$|I| = |2\sin[ka^2/(4x)]| = |2\sin[\pi a^2/(2\lambda x)]| \quad (2)$$

Отримана функція $|I|$ має максимуми при $x = a^2/[(2n - 1)\lambda]$ та мінімуми при $x = a^2/(2n\lambda)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$).

На рис. 1, (а) наведено зміну функції $|I|$ вздовж осі x . Функція створює ряд осциляцій зі збільшенням x . При $x \approx x_0 = a^2/\lambda$ вона досягає останнього максимуму (точне значення $x = x_0 - \lambda/4$) і потім монотонно зменшується відповідно до закону

$|I| = S_a/(\lambda x)$. Область $0 < x < x_0$, в якій функція $|I|$ створює осциляції, називають ближньою зоною, а область $x > x_0$ монотонного спаду функції $|I|$ – дальньою зоною [7].

На рис. 1 (а) штриховою лінією показана залежність $|I|$ від x . Вважається, що за період коливань амплітуда зменшується в 5 разів. Формування максимумів і мінімумів в ближній зоні перетворювача пояснюється великою різницею відстаней від різних точок перетворювача до деякої досліджуваної точки й пов'язано з цим різницею фаз сигналів, що приходять через середовище. Згідно з правилом Френеля поверхню випромінювача розбивають на концентричні кільця (зони Гюйгенса – Френеля) з центром в проекції точки, що відповідає центру перетворювача.

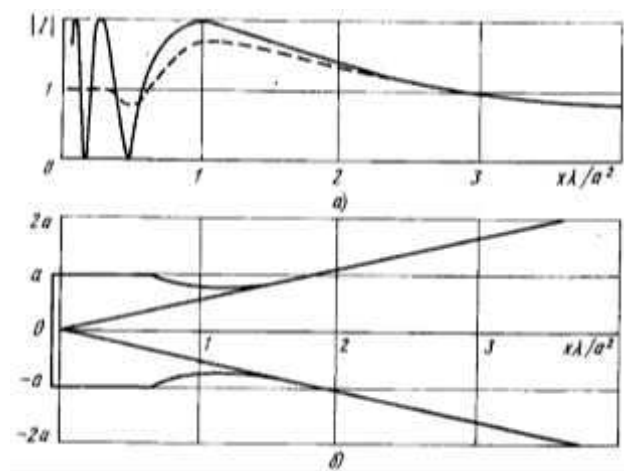


Рис. 1 – Поле на осі перетворювача (а) і його схематичне зображення (б)

Середня відстань від сусідніх кілець до точки спостереження відрізняється на $\lambda/2$, тому сигнали від сусідніх кілець приходять в протифазі. Площа S_k кожного наступного кільця збільшується зі збільшенням середньої відстані до кільця, так що завжди $S_k/r_k = \pi\lambda$, в зв'язку з чим сигнали, що випромінюються сусідніми кільцями, однакові і, якщо на перетворювачі розміщено парну кількість кілець, відбувається гасіння їх сигналів, тобто в цій точці поля спостерігають мінімум. При непарній кількості зон Гюйгенса– Френеля на поверхні перетворювача спостерігають максимум, що відповідає $2P_0$ [8].

Додавання дії сусідніх зон Гюйгенса-Френеля можна уявити так, що сигнали від половинок сусідніх кілець взаємно компенсуються, а від внутрішньої частини першої зони (в центрі випромінювача) і зовнішньої частини останньої (крайньої) зони – ні.

Випромінювання елементарними джерелами послаблює дію більш віддалених зон Гюйгенса-Френеля та повного гасіння сигналів від сусідніх кілець не відбувається. Якщо точка дії знаходиться в безпосередній близькості від перетворювача, на

ньому укладається дуже багато зон Гюйгенса-Френеля. Накопичена різниця сигналів від сусідніх кілець дорівнює збуджуючому тиску P_0 на перетворювачі.[9]

Розглянуту побудову можна виконати не тільки для точок на осі перетворювача, але і для інших точок простору. При цьому деякі кільця Гюйгенса-Френеля будуть неповними через обмежені розміри перетворювача. Однак, якщо точка знаходиться досить близько до перетворювача, впливом сигналів від периферійних неповних кілець на значення P можна знехтувати через його мале значення.

Розглянемо поширення ультразвукового сигналу в плинному середовищі як показано на рис. 2

У випадку поширення ультразвукової хвилі у плинному середовищі довжина хвилі λ залежно від густини ρ середовища буде змінюватися. Але оскільки плинне середовище має швидкість v то швидкість поширення звуку ультразвукової хвилі буде визначатися як $v = v_c \cos \alpha + v_y$, де кут α - це кут між швидкістю поширення ультразвукової хвилі та напрямком руху плинного середовища.

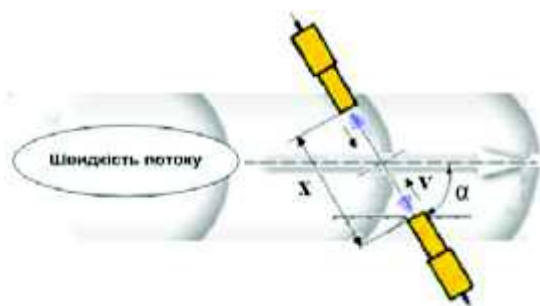


Рис. 2 – Поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі

Тоді при незмінній відстані x між сенсорами формула (2) набуде вигляду

$$|I| = |2\sin[kx]| = |2\sin[2\pi fx/v]|, \quad (3)$$

де v – швидкість поширення ультразвуку;
 f – частота ультразвукової хвилі.

Якщо ультразвукові перетворювачі знаходяться в природному газу, швидкість поширення в якому визначається як [10]

$$v_y = 18,59 \left(T \chi \frac{K}{\rho_c} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

де χ – показник адіабати природного газу, який при тисках близьких до атмосферного визначається як $\chi = \sum \chi_i$, χ_i – показник адіабати i -тої компоненти суміші;

K – коефіцієнт стисливості газу, що визначається за методами NX19 мод. або GERG-19, які деталізовані в ГОСТ 30319.2;

ρ_c – густина природного газу за стандартних умов.

Функція $|I|$ набуде вигляду [11]:

$$|I| = |2\sin[2\pi fx / (v_c \cos \alpha + 18,59 \left(T \chi \frac{K}{\rho_c} \right)^{0,5} x)]|, \quad (5)$$

Обговорення результатів

На рис 3 показано графік функції $|I|$ залежно від швидкості потоку v та частоти f ультразвукової хвилі.

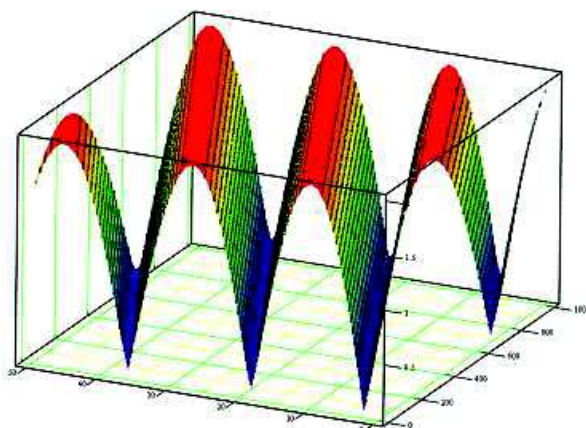


Рис. 3 – Графік функції $|I|$

З графіка видно, що тільки при певних співвідношеннях швидкості потоку і частоти функція $|I|$ набуває максимального значення. Розрахунок проведений в діапазоні частот 196 – 205 кГц при зміні швидкості потоку від нуля до 30 м/с.

Тоді тиск на приймачі з урахуванням ступеня зміни P частотної характеристики та затухання α шляхом послідовних перетворень формул (1) та (5) буде визначатися як

$$P = \frac{K}{S_a} P_0 e^{-\frac{(f-f_0)^2 - \left(\frac{v}{v_c}\right)^2 R}{2\sigma^2}} \times \left[2 \sin \left[\frac{2\pi fx}{v_c \cos \alpha + 18,59 \left(T \chi \frac{K}{\rho_c} \right)^{0,5} x} \right] \right]^2, \quad (6)$$

де f_0 – основна частота.

На рис. 4 показаний графік тиску залежно від швидкості потоку v та частоти f ультразвукової хвилі при відомому значенні густини ρ , відстані між перетворювачами x та температури T .

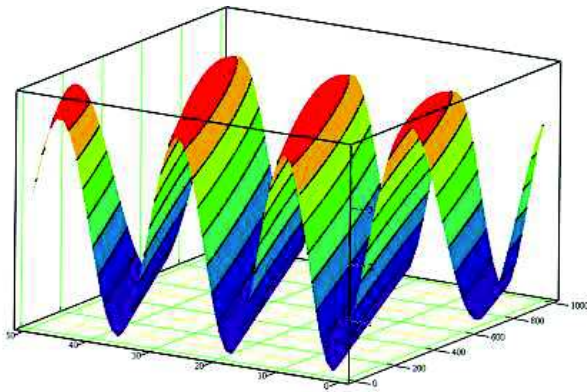


Рис. 4 – Графік статичного тиску ультразвукової хвилі

Формула (6) представляє собою математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, яка дає відповідь як веде себе сигнал в ближній зоні внаслідок зміни частоти та швидкості потоку. При цьому на величину вихідного сигналу суттєво впливає густина плинного середовища, його температура. Крім цього конкретно для природного газу має місце вплив показника адіабати γ та коефіцієнт стисливості газу K .

Висновки

Проведено дослідження особливостей розповсюдження акустичних хвиль ультразвукового діапазону в плинному середовищі. Розроблено математичну модель розповсюдження хвиль в плинному середовищі в межах ближньої зони. Встановлено основні параметри, які впливають на процес розповсюдження ультразвукових хвиль. Результати моделювання дозволили зробити висновок про можливість розробки метода вимірювання швидкості потоку на основі використання ближньої зони ультразвукового перетворювача.

Список літератури

1. Білинський, Й. Й. Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація [Електронний ресурс] / Й. Й. Білинський, М. О. Стасюк, М. В. Гладішевський // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 1. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3970/5732>.
2. Білинський, Й. Й. Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ / Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2016. – №2. – С. 23–29.
3. Furio Cascetta Measuring of compressed natural gas in automotive application: A comparative analysis of mass versus volumetric metering methods / Furio Cascetta, Giuseppe Rotondo, Marilena Musto // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2008. – Volume 19, Issue 6. – P. 338–341. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2008.05.003.

4. Tijdeман, H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes / H. Tijdeман // *Journal of Sound and Vibration*. – 1975. – Volume 39, Issue 1. – P. 1–33. – doi: 10.1016/S0022-460X(75)80206-9.
5. Bjerring, O. J. Non-invasive measurement of pressure gradients in pulsatile flow using ultrasound / O. J. Bjerring, T. M. Sand // *IEEE International Ultrasonics Symposium*. – 2013. – P. 2022–2025. – doi: 10.1117/12.2006732
6. Gudra, T. Ultrasonic transducers with directional converters of vibration of longitudinal-longitudinal type and longitudinal-longitudinal-longitudinal type intended to work in gaseous media / T. Gudra, L. Palasz // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2013. – No 133(5), P. 3600–3600. – doi: 10.1121/1.4806670.
7. Крюков, И. И. О размере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси / И. И. Крюков // *Акустический журнал*. – 1995. – Т. 41, № 1. – С. 101–105.
8. Mensah, S. Near-field ultrasound tomography / S. Mensah, E. Franceschini // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2007. – No 121(3). – P. 1423–33.
9. Zhu, H.-M. Statistics of ultrasonic speckles reflected from a rough surface / H.-M. Zhu, Q.-H. Qin // *Archive of Applied Mechanics*. – 2002. – No 72(2). – P. 189–198. – doi: 10.1007/s00419-002-0205-1.
10. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. – Введ. 1996-04-12. – М.: Издательство стандартов. – 1997. – 72с.
11. Blomme, E. Plane-wave analysis of the near field of light diffracted by ultrasound / E. Blomme, O. Leroy // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 1992. – No 91(3). – P. 1474–1483.

Bibliography (transliterated)

1. Bilynsky, Y. Y., Stasjuk, M. O., Hladysevs'kyj, M. V. Analiz metodiv i zasobiv kontrolju vytrat ridkych i hazopodibnych seredovysc ta ichnja klasyfikacija [Web]. *Naukovi praci VNTU*, 2015, 1, Rezym dostupu: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3970/5732>.
2. Bilynsky, Y. Y., Hladysevs'kyj, M. V. Analiz ultrazvukovykh zasobiv vymirjuval'noho kontrolju vytraty plynnykh seredovysc. *Vymirjuval'na ta obcslyjuval'na tehnika v tehnolohicnykh procesach*, 2016, 2, 23–29.
3. Furio, C., Giuseppe, R., Marilena, M. Measuring of compressed natural gas in automotive application: A comparative analysis of mass versus volumetric metering methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2008, 19(6), 338–341, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2008.05.003.
4. Tijdeман, H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, 39(1), 1–33, doi: 10.1016/S0022-460X(75)80206-9.
5. Bjerring, O.J., Sand, T.M. Non-invasive measurement of pressure gradients in pulsatile flow using ultrasound, *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2013, 2022–2025, doi: 10.1117/12.2006732.
6. Gudra, T., Palasz, L. Ultrasonic transducers with directional converters of vibration of longitudinal-longitudinal type and longitudinal-longitudinal-longitudinal type intended to work in gaseous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(5), 3600–3600, doi: 10.1121/1.4806670.
7. Krjukov, Y. Y. O razmere blyznej zony ploskych ultrazvukovykh preobrazovatelej, nachodjascyhся na odnoj osy. *Akustyceskij zurnal*, 1995, T. 41, 1, 101–105.

8. **Mensah, S., Franceschini, E.** Near-field ultrasound tomography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, **121**(3), 1423–33.
9. **Zhu, H. M., Qin, Q. H.** Statistics of ultrasonic speckles reflected from a rough surface. *Archive of Applied Mechanics*, 2002, **72**(2), 189–198, doi: 10.1007/s00419-002-0205-1.
10. **GOST 30319.2-96.** Naz pryrodnyii. Metodyi rasceta fizyceskych svojstv, Vved. 1996-04-12, M.: Yzdatefstvo standartov, 1997, 72 p.
11. **Blomme, E., Leroy, O.** Plane-wave analysis of the near field of light diffracted by ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, **91**(3), 1474–1483.

Відомості про авторів (About authors)

Білінський Йосип Йосипович – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електроніки та наносистем; м. Вінниця, Україна; e-mail: yosyp-bilynsky@ya.ru

Bilynsky Yosyp – Doctor of Technical Sciences, Professor, chairperson of electronics and nanosystem, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine; e-mail: yosyp-bilynsky@ya.ru

Гладишевський Микола Володимирович – головний фахівець філії Центр метрології та газорозподільних систем НАК «Нафтогаз України», м. Боярка, Україна; e-mail: mgladyshvskyi@yahoo.com

Gladyshevskiy Mykola – Lead specialist of Center for Metrology and gas distribution network NJSC “Naftogaz of Ukraine”; Boyarka, Ukraine; mgladyshvskyi@yahoo.com

Бурдейний Валентин Борисович – магістрант кафедри електроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна.

Burdany Valentyn – Master’s degree student, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Білінський, Й. Й. Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі / **Й. Й. Білінський, М. В. Гладишевський, В. Б. Бурдейний** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 17-21. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.03.

Please cite this article as:

Bilynsky, Y., Gladyshevskiy, M., Burdany, V. Model of distribution of ultrasonic waves in flowing medium. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 17–21, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.03.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Билинский, И. И. Модель распространения ультразвуковых волн в изменяющейся среде / **И. И. Билинский, Н. В. Гладишевский, В. Б. Бурдейный** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 17-21. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.03.

АННОТАЦИЯ В работе проведено исследование особенностей распространения акустических волн ультразвукового диапазона в текучей среде. Исследование позволило разработать модель распространения ультразвуковых волн в пределах ближней зоны. Детальный анализ распространения волн дало возможность установить давление ультразвуковой волны на приемнике, в зависимости от скорости потока и частоты колебаний. Таким образом, результаты моделирования позволили сделать вывод о возможности разработки метода измерения скорости потока на основе использования ближней зоны ультразвукового преобразователя.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания; ближняя зона; давление звуковой волны; скорость потока; частота ультразвуковых колебаний; скорость распространения волны; текучая среда.

Надійшла (received) 13.12.2016